

**ESTERIFIKASI ASAM ASETAT DENGAN ETANOL  
MEMAKAI KATALISATOR AMBERLYST-15  
(PENGEMBANGAN MODEL MATEMATIK DENGAN MEMPERHATIKAN TRANSFER MASSA  
DAN EFFECTIVENESS FACTOR)**

I Made Bendiyasa<sup>1</sup>

**ABSTRACT**

*Redevelopment of mathematical model published by Rahayu (1995) has been done. In this model, system was evaluated using a heterogeneous model and convective mass transfer coefficient,  $k_{SLA}$ , was evaluated separately. Effectiveness factor and chemical rate constant cannot be evaluated separately and they are combined together in terms of  $\eta k_{RI}$ . Based on evaluated results of convective mass transfer and combined chemical and intraparticle resistance show that system is controlled by chemical reaction and intraparticle diffusion. It is shown also that the heterogeneous model can be simplified to be pseudo homogeneous first order reaction. If it is based on  $10^0$  coefficient, it is also found that chemical reaction controls the studied system.*

**PENDAHULUAN**

Pada tulisan ini akan dikembangkan model yang relatif lebih lengkap dibandingkan dengan model yang telah dikembangkan oleh Rahayu (1995). Pada model yang terdahulu model secara tidak langsung dianggap homogen, tetapi pada sistem ini akan ditinjau sebagai sistem heterogen, dengan memperhatikan adanya transfer massa dan reaksi kimia secara serentak, seperti pada kenyataan yang ada.

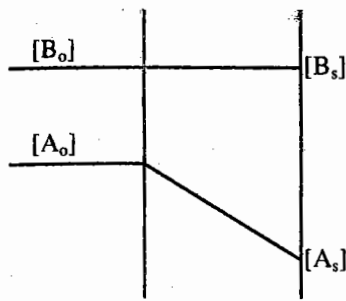
Esterifikasi telah banyak dipelajari baik menggunakan katalisator cair maupun padat. Salah satu katalisator cair yang banyak dipakai adalah asam sulfat. Pemakaian asam sulfat menimbulkan banyak problem seperti pembentukan hasil samping dan reaksi polimerisasi (Sanchez et al., 1992). Katalisator asam sulfat dipakai oleh Leyes dan Othmer (1945) untuk estrifikasi asam asetat dengan butanol, oleh McCracken dan Dickson (1967) untuk reaksi antara asam asetat dengan sikloheksan, oleh Sreeramulu dan Rao (1973) untuk reaksi asam palmitat dengan isobutil alkohol, oleh Indu et al. (1993) untuk reaksi esterifikasi asam formiat dengan metanol.

Pemakaian katalisator padat pada reaksi esterifikasi telah banyak dilakukan. Keuntungan pemakaian katalisator padat antara lain (Roy dan Bhatia, 1987): (a) zat pereaksi dan hasil lebih mudah dipisahkan, (b) esterifikasi dapat dilakukan secara kontinu, (c) kemurnian hasil lebih tinggi karena hasil samping dapat dieliminasi atau kurang signifikan, (d) dimungkinkan untuk mengisolasi hasil antara, dan (e) ion exchange resin dapat membedakan molekul besar dan kecil. Roy dan Bathia (1987) mempelajari reaksi

esterifikasi asam asetat dengan *benzyl alcohol* memakai katalisator padat yang bersifat asam, amberlyst-15. Mereka mendapatkan bahwa amberlyst-15 merupakan katalisator yang sesuai untuk reaksi esterifikasi. Disamping itu juga diperoleh bahwa amberlyst-15 dapat dipakai beberapa kali tanpa banyak mengalami perubahan aktivitas yang berarti. Yadav et al. (1994) melakukan penelitian proses esterifikasi pembuatan *phenethyl acetate* dan *cyclohexyl acetate* memakai bermacam-macam katalisator padat yang bersifat asam. Mereka mendapatkan bahwa katalisator yang paling aktif persatuan berat adalah amberlyst-15. Rahayu (1995) memakai katalisator amberlyst-15 pada proses esterifikasi asam asetat dengan etanol untuk mempelajari kinetika deaktivasi katalisator. Tenaga aktivasi yang diperoleh tanpa memperhatikan deaktivasi dan dengan memperhitungkan terjadinya deaktivasi berturut-turut adalah 12799 dan 13828 cal/gmol. Terlihat perbedaan tenaga aktivasi yang diperoleh tidak signifikan. Pendekatan yang dipakai untuk menganalisis hasil penelitian yang diperoleh adalah memakai pendekatan homogen semu.

Paper ini ditulis berdasarkan data yang telah di publikasikan oleh Rahayu (1995). Model matematik dijabarkan berdasarkan sistem sesungguhnya yaitu sistem heterogen. Berdasarkan data yang ada, perbandingan antara etanol dengan asam asetat sekitar 9, sehingga dianggap bahwa etanol selalu tersedia pada permukaan katalisator. Penyusunan model matematik didasarkan pada skema yang terlukis pada gambar 1.

<sup>1</sup> Ir. I Made Bendiyasa, M.Sc., Ph.D., Dosen Jurusan Teknik Kimia, FT-UGM



$[A_o]$  = konsentrasi asam asetat pada badan cair,  $\text{gmol/cm}^3$   
 $[A_s]$  = konsentrasi asam asetat pada permukaan katalisator,  $\text{gmol/cm}^3$   
 $[B_o]$  = konsentrasi etanol pada badan cair,  $\text{gmol/cm}^3$   
 $[B_s]$  = konsentrasi etanol pada permukaan katalisator,  $\text{gmol/cm}^3$   
 $[B_s] = [B_o]$

Gambar 1. Skema konsentrasi reaktan

Pada keadaan ajeg (*steady state*), kecepatan transfer massa A (asam asetat) persatuan volum cairan adalah:

$$R_A = k_{SL-A} a_p \{ [A_o] - [A_s] \} \quad (1)$$

=  $\text{gmol/cm}^3 \text{ s}$

dan kecepatan reaksi pada permukaan,

$$R_A = \eta k_{R2} w [B_s][A_s] \quad (2)$$

=  $\text{gmol/cm}^3 \text{ s}$

dengan  $k_{R2}$  = konstante kecepatan reaksi order 2,  $(\text{cm}^3/\text{gmol})(\text{cm}^3/\text{g s})$ ;  $w$  = berat katalisator persatuan volum cairan,  $\text{g/cm}^3$ ;  $k_{SL-A}$ ,  $\text{cm/detik}$ , dan  $\eta$  = *effectiveness factor*, tidak berdimensi.

Jumlah asam asetat sangat terbatas sehingga keberadaannya pada permukaan katalisator tidak merata. Hal ini disebabkan adanya hambatan difusi di dalam partikel padatan (katalisator), sedangkan konsentrasi etanol hampir merata diseluruh permukaan katalisator karena jumlahnya yang sangat berlebihan. Untuk partikel berbentuk bola dengan jari-jari,  $R$ , dan reaksi order satu (*first order*), maka perbandingan konsentrasi asam asetat,  $[A]$  pada suatu posisi  $r$  dari pusat bola terhadap konsentrasi asam asetat pada permukaan katalisator,  $[A_s]$  dapat dinyatakan (Yadav et al., 1994):

$$\frac{[A]}{[A_s]} = \frac{\sinh\left(\frac{3\phi r}{R}\right)}{\left(\frac{r}{R}\right) \sinh(3\phi)} \quad (3)$$

dengan  $\phi$  = modulus Thiele =  $\left(\frac{R}{3}\right) \left(\frac{\rho_p k_{R1}}{D_e}\right)^{1/2} \quad (4)$

$$k_{R1} = k_{R2} [B_o] \quad (5)$$

= konstante kecepatan reaksi order satu semu,  $(\text{cm}^3/\text{g})(1/\text{detik})$

$D_e$  = difusivitas efektif,  $\text{cm}^2/\text{detik}$ ;

$\rho_p$  = densitas partikel,  $\text{g/cm}^3$

Pengaruh difusi di dalam partikel (*intraparticle diffusion*) dapat dinyatakan dengan konsep *effectiveness factor* (Froment dan Bischoff, 1990),  $\eta$ :

$$\eta = \left(\frac{1}{\phi}\right) \left(\coth(3\phi) - \frac{1}{3\phi}\right) \quad (6)$$

Dari persamaan (1), (2) dan (5) didapat hubungan:

$$R_A = [A_o] \left( \frac{1}{k_{SL-A} a_p} + \frac{1}{\eta k_{R1} w} \right)^{-1} \quad (7)$$

dengan  $a_p = \frac{6w}{\rho_p d_p} \quad (8)$

= luas bidang kontak padat-cair,  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$

Substitusikan persamaan (8) ke persamaan (7) didapat persamaan (9),

$$R_A = [A_o] w \left( \frac{\rho_p d_p}{6k_{SL-A}} + \frac{1}{\eta k_{R1}} \right)^{-1} \quad (9)$$

Untuk proses *batch* kecepatan pengurangan asam asetat setiap saat dapat dinyatakan dengan persamaan (10):

$$-\frac{d[A_o]}{dt} = [A_o] w \left( \frac{\rho_p d_p}{6k_{SL-A}} + \frac{1}{\eta k_{R1}} \right)^{-1} \quad (10)$$

dengan  $t$  = waktu, detik

Persamaan (10) mengandung tiga parameter yaitu,  $k_{SL-A}$ ,  $\eta$ , dan  $k_{R1}$ . Parameter,  $\eta$ , mengandung parameter,  $D_e$  dan  $k_{R1}$ . Nilai  $k_{SL-A}$ , dihitung secara terpisah dengan asumsi bahwa nilai bilangan

$$\text{Sherwood} = \frac{k_{SL-A} d_p}{D_{AB}} = 2 \quad (11)$$

sehingga dengan demikian parameter yang masih terkandung pada persamaan (10) adalah dua yaitu  $D_e$  dan  $k_{R1}$ . Nilai  $D_{AB}$  di perkirakan dengan persamaan Wilke dan Chang (Treybal, 1981) sebagai berikut:

$$D_{AB} = \frac{117,3 \times 10^{-18} (\varphi M_B)^{1/2} T}{\mu v_A^{0.6}}, \text{ m}^2/\text{detik} \quad (12)$$

dengan

- $D_{AB}$  = difusivitas efektif A di dalam B, m<sup>2</sup>/detik;  
 $M_B$  = 46, berat molekul B (etanol), kg/kmol;  
 $T$  = suhu, K;  
 $\mu$  = kekentalan larutan, kg/m s;  
 $\phi$  = 1,5 untuk etanol;  
 $v_A$  = 0,098 m<sup>3</sup>/kmol, volum molal solut pada titik didih normal.

Setelah nilai  $\phi$ ,  $v_A$  dan  $M_B$  dimasukkan ke dalam persamaan (12) didapat:

$$D_{AB} = 3,9263 \times 10^{-15} \frac{T}{\mu}, \text{ m}^2/\text{detik} \quad (13)$$

atau

$$D_{AB} = 3,9263 \times 10^{-11} \frac{T}{\mu}, \text{ cm}^2/\text{detik} \quad (14)$$

Setelah nilai  $k_{SL-A}$ , terhitung, lalu dimasukkan ke persamaan (10), sehingga ada dua parameter yang harus dievaluasi, yaitu  $\eta$  dan  $k_{R1}$  atau  $D_e$  dan  $k_{R1}$ . Persamaan (10) dapat dinyatakan dalam bentuk konversi,  $x_A$ , seperti terlihat pada persamaan (15):

$$-\frac{d[x_A]}{dt} = [1 - x_A] w \left( \frac{\rho_p d_p}{6k_{SL-A}} + \frac{1}{\eta k_{R1}} \right)^{-1} \quad (15)$$

dengan keadaan awal  $t=0$ ,  $x_A=0$  dan  $t=t$ ,  $x_A=x_A$  (16)

Jika persamaan (15) diintegrasikan dengan keadaan awal dan batas seperti terlihat pada persamaan (16) didapat:

$$-\ln(1 - x_A) = w \left( \frac{\rho_p d_p}{6k_{SL-A}} + \frac{1}{\eta k_{R1}} \right)^{-1} t \quad (17)$$

Bila dibuat hubungan  $-\ln(1 - x_A)$  dengan  $t$  dan didapat garis lurus, maka tangen arah garis yang didapat adalah:

$$\alpha = w \left( \frac{\rho_p d_p}{6k_{SL-A}} + \frac{1}{\eta k_{R1}} \right)^{-1} \quad (18)$$

Karena nilai  $w$ ,  $\rho_p$ ,  $d_p$  diketahui dan nilai  $k_{SL-A}$  telah dievaluasi dengan asumsi bahwa nilai bilangan Sherwood = 2, maka nilai yang dapat dihitung adalah nilai gabungan nilai,  $\beta = \eta k_{R1}$ , seperti ditunjukkan pada persamaan (18).

Umumnya, nilai  $k_{R1}$  dicari secara terpisah dengan jalan melakukan percobaan dengan menggunakan berbagai ukuran butir katalisator yang berbeda. Setelah nilai  $k_{R1}$  diperoleh, maka nilai  $\eta$  dapat

dievaluasi dan akhirnya nilai difusivitas efektif di dalam butiran dapat dihitung.

Jika hambatan transfer massa konveksi dan difusi di dalam patikel diabaikan di dapat persamaan untuk kinetika intrinsik (*intrinsic kinetics*), sebagai berikut :

$$-\frac{d[A_o]}{dt} = k_{R1} w [A_o] \quad (19)$$

$$\text{atau} \quad -\frac{d[A_o]}{dt} = k_1 [A_o] \quad (20)$$

dengan  $k_1 = k_{R1} w$  (21)

Integrasikan persamaan (20) dengan keadaan awal dan batas berturut-turut  $t = 0$ ,  $[A_o] = [A_o]_i$  dan  $t = t$ ,  $[A_o] = [A_o]$ , diperoleh:

$$-\ln \frac{[A_o]}{[A_o]_i} = k_1 t \quad (22)$$

dengan  $[A_o]_i$  = konsentrasi asam asetat awal pada fase cair. Dalam bentuk konversi,  $x_A$ , persamaan (22) dapat ditulis menjadi:

$$-\ln(1 - x_A) = k_1 t \quad (22)$$

$$\text{dengan } x_A = \frac{[A_o]_i - [A_o]}{[A_o]_i} \quad (23)$$

Model yang ditunjukkan persamaan (15) atau (20) sesuai dengan model yang dipakai oleh Rahayu (1995). Bila dibuat grafik yang menunjukkan hubungan antara  $-\ln(1 - x_A)$  dengan  $t$ , seperti ditunjukkan pada persamaan (17) atau (22), akan didapat nilai  $k_1$  yang merupakan tangen arah suatu garis lurus. Pada model sesuai dengan model yang diusulkan pada paper ini, yaitu nilai  $\beta = \eta k_{R1}$  dapat dievaluasi dengan persamaan (24).

$$\frac{k_1}{w} = \left( \frac{\rho_p d_p}{6k_{SL-A}} + \frac{1}{\eta k_{R1}} \right)^{-1} \quad (24)$$

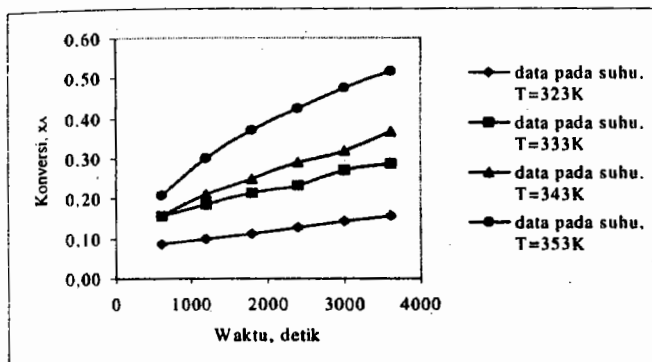
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Seperti telah diterangkan pada pendahuluan, tulisan ini didasarkan pada pengembangan model matematik yang telah dipublikasikan oleh Rahayu (1995). Tabel I dan gambar 2, menunjukkan data yang akan dievaluasi dan terlihat bahwa makin tinggi suhu makin tinggi konversi asam asetat yang bereaksi.

Tabel I. Konversi asam asetat,  $x_A$ , pada pelbagai suhu dan waktu (Sumber: Rahayu, 1995, dan  $w = 0,0294$  g katalisator/cm<sup>3</sup>)

Suhu, K	Konversi, $x_A$ , pada pelbagai waktu, menit					
	10	20	30	40	50	60
323	0,0854	0,0993	0,1132	0,1284	0,1429	0,1551
333	0,1572	0,1864	0,2123	0,2334	0,2707	0,2869
343	0,1566	0,2120	0,2500	0,2896	0,3180	0,3671
353	0,2079	0,2995	0,3715	0,4239	0,4763	0,5155

\*  $d_p$  lebih kecil dari 1.0 mm (0,1cm)



Gambar 2. Hubungan antara konversi asam asetat dengan waktu

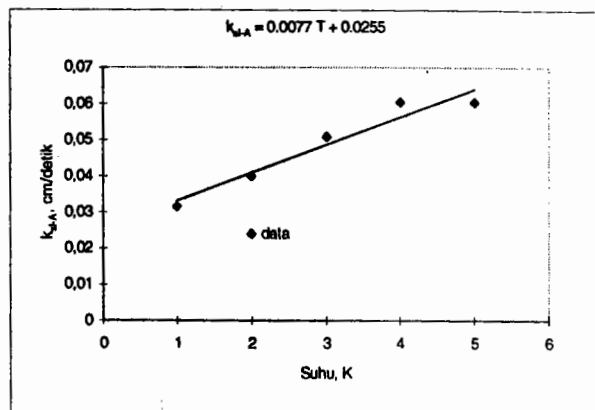
Tabel II menunjukkan nilai  $k_{SL-A}$  pada pelbagai suhu yang dihitung dengan persamaan (11) dan  $D_{AB}$  dihitung dengan persamaan (14). Kekentalan larutan etanol dibaca pada Kern (1950). Terlihat bahwa makin tinggi suhu, nilai  $k_{SL-A}$  makin tinggi, seperti juga terlukiskan pada gambar 3. Nilai  $k_{SL-A}$  berbanding lurus dengan suhu, dan dapat dinyatakan dengan persamaan (25):

$$k_{SL-A} = 0,001 T - 0,2801 \quad (25)$$

dengan  $T = K$  dan koefisien korelasi,  $r = 0,9991$ . Persamaan (25) hanya berlaku untuk nilai  $k_{SL-A}$  positif, karena jika nilainya negatif,  $k_{SL-A}$  tidak mempunyai arti fisis.

Tabel II. Nilai  $k_{SL-A}$  pada berbagai suhu

No.	Suhu, K	$k_{SL-A} \times 10^2$ , cm/detik
1.	323	3,1705
2.	333	4,0230
3.	343	5,0820
4.	353	6,0261



Gambar 3. Hubungan antara  $k_{SL-A}$  dengan suhu

Nilai  $k_1$  berdasarkan data yang tersedia, dievaluasi kembali dengan cara kuadrat terkecil didapat, hubungan dalam bentuk Arrhenius sebagai berikut:

$$k_1 = 2,031 \cdot 10^6 e^{\frac{-13426}{RT}} \quad (26)$$

dengan  $R = 1,98719$  cal/gmol K,  $T = K$ .

Karena data ukuran butiran yang tersedia hanya ada satu macam yaitu ukurannya sekitar 0,1 cm maka konstante kecepatan reaksi intrinsik tidak dapat dianalisis secara terpisah, sehingga nilai yang dapat dievaluasi adalah gabungan nilai  $\eta k_{R1} = \beta$ . Tabel III menunjukkan nilai hambatan pada transfer massa pada fase cair,  $\frac{\rho_p d_p}{6 k_{SL-A}}$  dan hambatan transfer massa

dan reaksi kimia di dalam katalisator,  $\frac{1}{\eta k_{R1}}$ . Terlihat

pada Tabel III bahwa hambatan reaksi kimia dan transfer massa di dalam katalisator sangat berpengaruh. Jadi disimpulkan bahwa nilai  $\frac{w}{k_1} \cong \frac{1}{\eta k_{R1}}$  atau nilai  $w \eta k_{R1} \cong k_1$ . Untuk

mengetahui diantara reaksi kimia atau transfer massa di dalam butir yang menentukan maka perlu dilakukan penelitian lebih jauh seperti telah diterangkan dimuka.

Yadav dan Mahta (1994) memberikan suatu kriteria jika reaksi kimia sangat lambat dibandingkan dengan transfer massa secara difusi sebagai berikut:

$$\frac{1}{\eta k_{R1}} \gg \frac{\rho_p d_p}{k_{SL-A} 6} \quad (27)$$

Perbandingan  $\frac{1}{\eta k_{R1}}$  dengan  $\frac{\rho_p d_p}{6k_{SL-A}}$  adalah antara

860 sampai 2675. Berdasarkan kriteria yang diberikan oleh Yadav dan Mahta (1994), terlihat bahwa reaksi kimia yang mengendalikan sistem yang dipelajari. Jika dievaluasi berdasarkan kenaikan suhu  $10^\circ\text{C}$ , nilai  $\eta k_{R1}$ , seperti terlihat pada Tabel IV, naik menjadi sekitar 1,8 sehingga dapat disimpulkan bahwa reaksi kimia yang mengendalikan sistem yang dipelajari.

Tabel III. Hambatan transfer massa pada fase cair dan gabungan transfer massa dan reaksi kimia, (gram katalisator)(detik)/(cm<sup>3</sup>) ( $\rho_p = 0,75 \text{ g/cm}^3$ ,  $w = 0,0294 \text{ g/cm}^3$ , dan  $d_p = 0,1 \text{ cm}$ )

Suhu, K	$\frac{w}{k_1}$ , gram katalisator/cm <sup>3</sup> (detik)	Hambatan transfer massa pada fase cair, $\frac{\rho_p d_p}{6k_{SL-A}}$	Hambatan transfer massa dan reaksi kimia di dalam katalisator, $\frac{1}{\eta k_{R1}}$
323	1054,602	0,394	1054
333	562,713	0,311	562
343	311,453	0,246	311
353	178,260	0,207	178

Tabel IV. Nilai  $\eta k_{R1}$  pada berbagai suhu [(gram katalisator)(detik)/(cm<sup>3</sup>)]<sup>-1</sup> ( $\rho_p = 0,75 \text{ g/cm}^3$ ;  $w = 0,0294 \text{ g/cm}^3$ ; dan  $d_p = 0,1 \text{ cm}$ )

Suhu, T, K	Hambatan transfer massa dan reaksi kimia di dalam katalisator, $\eta k_{R1} \times 10^4$	$\frac{\eta k_{R1} \text{ pada } (T + 10)}{\eta k_{R1} \text{ pada } (T)}$	$\frac{(T + 10)}{T}$
323	9,49	-	-
333	17,79	1,88	333/323
343	32,15	1,81	343/333
353	56,18	1,75	353/343

## KESIMPULAN

Hasil evaluasi dengan model matematik baru yang tersusun, dapat disimpulkan bahwa:

1. Model heterogen yang diajukan ternyata menghasilkan bentuk persamaan yang ekuivalen dengan model pseudo homogen order satu.

2. Model matematik yang diajukan disertai persamaan empiris pustaka untuk  $D_{AB}$  dan anggapan bilangan Sherwood = 2 dapat dipakai untuk mengevaluasi hambatan transfer massa konveksi dan gabungan hambatan transfer massa di dalam partikel dan reaksi kimia secara serentak.
3. Hambatan transfer massa konveksi transfer massa fase cair sangat kecil, yaitu antara 0,207 sampai dengan 0,394 dan hambatan transfer massa didalam partikel dan reaksi kimia antara 178 sampai 1054.
4. Nilai  $k_{R1}$  dan  $\eta$  tidak dapat dievaluasi secara terpisah berdasarkan data yang tersedia.
5. Reaksi kimia mengontrol kecepatan sistem yang dipelajari.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada semua mitra bestari (reviewer) yang telah memberikan koreksi dan saran dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu sehingga tulisan ini dapat dipublikasikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Froment, G.F. and Bischoff, K.B., 1990, "Chemical Reactor Analysis and Design", 2<sup>nd</sup>, pp. 159; 164, John Wiley & Sons, New York.
- Indu, B., Ernst, W.R. and Gelbaum, L.T., 1993, "Methanol-Formic Acid Esterification Equilibrium in Sulfuric Acid Solutions: Influence of Sodium Salts", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **32**, 981-985.
- Kern, D.Q., 1950, "Process Heat Transfer", p.823, McGraw-Hill, Kogakusha, Ltd., Tokyo.
- Leyes, C.E. and Othmer, D.F., 1945, "Esterification of Butanol and Acetic Acid", *Industrial and Engineering Chemistry*, **37**, 10, 968-977.
- McCracken, D.J. and Dickson, P.F., 1967, "Reaction Kinetics of Cyclohexanol-Acetic Acid Esterification", *I & EC Process Design and Development*, **6**, 3, 286-293.
- Rahayu, S.S., 1995, "Kinetika Deaktifasi Katalisator Amberlyst-15", *Media Teknik*, **2**, 70-73.
- Roy, R. and Bhatia, S., 1987, "Kinetics of Esterification of Benzyl Alcohol with Acetic Acid Catalysed by Cation-Exchange Resin (Amberlyst-15)", *J. Chem.Tech. Biotechnol.*, **37**, 1-10.
- Rudd, D.F. and Watson, C.C., 1968, "Strategy of Process Engineering", pp. 170-172, John Wiley & Sons, Inc., New York.

- Sanchez, N., Coteron, A., Martínez, M. and Aracil, J., 1992, "Kinetic Analysis and Modeling of the Esterification of Oleic Acid and Oleyl Alcohols Using Cobalt Chloride as Catalyst", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **31**, 1985-1988.
- Shoup, T.E., 1983, "Numerical Methods for the Personal Computer", pp. 113-114, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Shreeramulu, V. and Rao, P.B., 1973, "Kinetics of Esterification of Isobutyl Alcohol with Palmitic Acid Using Sulfuric Acid Catalyst", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, **12**, 4, 483-485.
- Treyball, R.E., 1981, "Mass-Transfer Operations", p. 35, McGraw-Hill International Book Company, Tokyo.
- Westerterp, K.R., van Swaay, W.P.M and Beenackers, A.A.C.M., 1984, "Chemical Reactors Design and Operation", p.16, John Wiley & Sons, Chichester.
- Yadav, G.D and Metha, P.H., 1994, "Heterogeneous Catalysis in Esterification Reactions: Preparation of Phenethyl Acetate and Cyclohexyl Acetate by Using a Variety of Solid Acidic Catalysts", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **33**, 2198-2208.